

исследования. – 2005. – № 11. – С. 108-112.

2. Кульков В.Г. Диффузионная модель внутреннего трения в нанокристаллическом материале // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77. – № 3. – С. 43-48.

3. Кульков В.Г. Межзеренное проскальзывание по границе, сопрягающей плотноупакованную и некристаллографическую плоскости // Вестник МЭИ. – 2005. – № 5. – С. 96 – 100.

4. Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах / С.А. Гриднев, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, О.В. Стогней. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 352 с.

5. Калинин Ю.Е., Даринский Б.М. Высокотемпературный фон внутреннего трения в твердых телах // МиТОМ. – 2012. – №5. – С. 15 – 18.

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА КОМПОНЕНТА УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО КАСКАДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА.**

*Афанасьев Виктор Леонидович – аспирант, ассистент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, тел. 8-952-833-4627, E-mail: buguvix@mail.ru*

*Карандей Владимир Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий*

*Сташ Адам Нурбиевич – студент, гр.15-ЗНМ-ЭЭ1*

*Кубанский государственный технологический университет, 350072 г.Краснодар, ул. Московская 2*

Большой сложностью при проектировании электрических приводов различных конструкций [1-2] является расчет электромагнитных параметров компонентов [3-4]. Необходимо применять сложный математический аппарат [5-7] для определения магнитных параметров, даже для неподвижной системы, тем более большой сложностью является определение магнитных параметров при изменении положения ротора, так как происходит постоянное и непрерывное изменение магнитных параметров, в частности магнитных сопротивлений. Предлагается новый подход к определению магнитных параметров для подвижной системы координат [8]. Приведен пример определения магнитных параметров типового электрического двигателя АИР63А4У3.

#### **1 Определение магнитных сопротивлений статора**

При изменении положения ротора происходит постоянное изменение величины магнитных параметров в частности магнитных сопротивлений участков магнитной системы электрической машины таких как: зубцовая зона статора и ротора, а также воздушного зазора (рисунок 1;2;3). Нам удалось получить расчетные формулы позволяющие определить магнитные сопротивления при изменении положения ротора.

Магнитные сопротивления находятся по следующей зависимости:

$$R_{zi}^{(k)} = \frac{2}{\mu_0} \frac{\delta}{n b_{zp} l_m}, \quad (1)$$

где  $R_{zi}^{(k)}$  – общее магнитное сопротивление воздушного зазора  $i$ -ой катушки при  $(k)$ -ом угле сдвига оси поля ротора относительно оси поля статора;  $n$  – коэффициент для каждого сопротивления.

Коэффициент  $n$  показывает изменение магнитного сопротивления. В таблице 1 приведены значения коэффициента для всех катушек и всех положений оси поля ротора относительно оси поля статора.

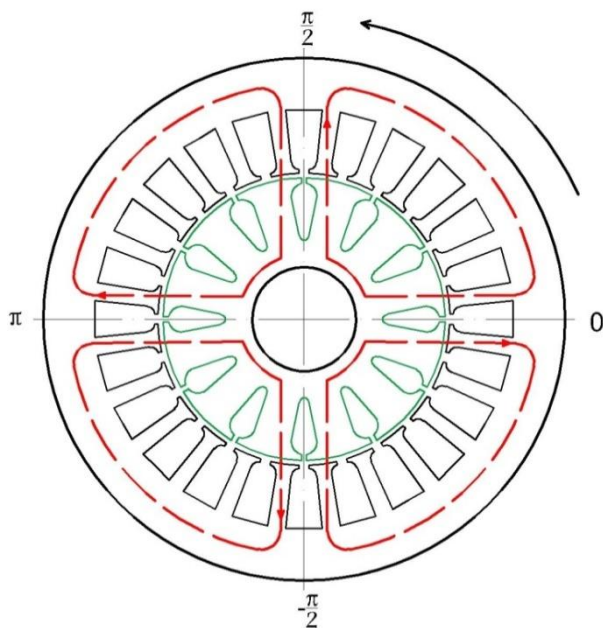


Рис.1. Угол поворота ротора 0 градусов

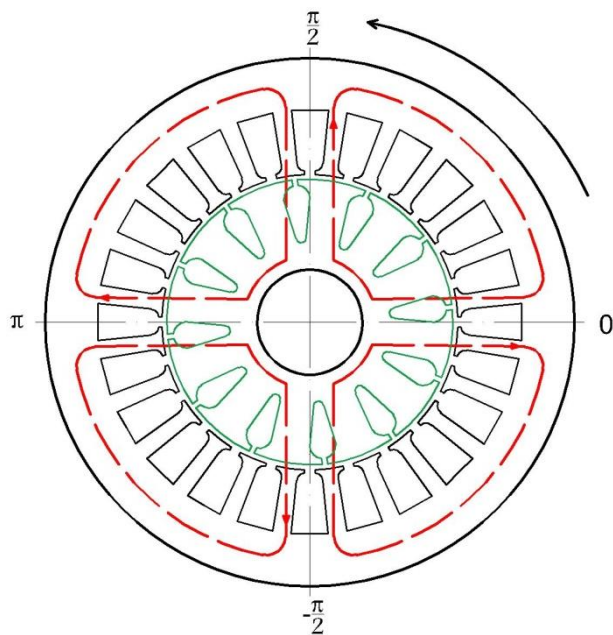


Рис.2. Угол поворота ротора 6 градусов

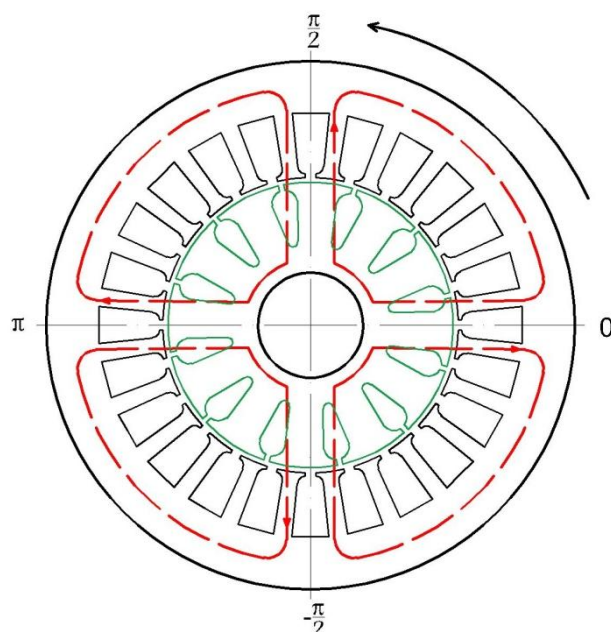


Рис.3. Угол поворота ротора 12 градусов

Таблица 1. Значение коэффициента  $n$ 

Угол поворота оси	Номер катушки											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5
1,5	3,539	2,461	3,538	2,462	3,538	2,461	3,538	2,461	3,5377	2,461	3,538	2,461
3	3,539	2,462	3,538	2,462	3,538	2,461	3,538	2,460	3,5377	2,461	3,537	2,461
4,5	3,539	2,461	3,538	2,462	3,538	2,461	3,538	2,461	3,5377	2,461	3,538	2,461
6	3,538	2,461	3,537	2,462	3,537	2,462	3,538	2,461	3,5374	2,461	3,537	2,461
7,5	3,5391	2,4622	3,5389	2,4622	3,538	2,4619	3,5377	2,4616	3,5377	2,4616	3,538	2,4619
9	3,5391	2,461	3,538	2,4625	3,5385	2,4625	3,5388	2,4619	3,53748	2,4614	3,5377	2,4622
10,5	3,5385	2,4622	3,5385	2,4622	3,538	2,4616	3,5385	2,4614	3,5377	2,4611	3,538	2,4619
12	3,5385	2,4619	3,538	2,4622	3,538	2,4622	3,5383	2,4619	3,5374	2,4614	3,5372	2,4614
13,5	3,538	2,4622	3,5385	2,4619	3,538	2,461	3,5377	2,461	3,5377	2,461	3,538	2,461
15	3,500	2,5	3,502	2,5	3,500	2,5	3,499	2,5	3,5001	2,5	3,4995	2,5
16,5	3,462	2,538	3,4622	2,5383	3,4622	2,538	3,4622	2,5377	3,4622	2,537	3,4622	2,538
18	3,462	2,538	3,4625	2,5383	3,461	2,5383	3,4616	2,538	3,4614	2,537	3,4614	2,5377
19,5	3,463	2,5383	3,4622	2,538	3,4616	2,538	3,4616	2,538	3,4614	2,537	3,4619	2,538
21	3,4597	2,5352	3,458	2,5383	3,4633	2,5385	3,4647	2,5388	3,4641	2,539	3,4603	2,538
22,5	3,4622	2,5383	3,4622	2,5385	3,4622	2,538	3,4622	2,5377	3,4616	2,538	3,4619	2,538
24	3,461	2,535	3,46	2,536	3,462	2,539	3,467	2,541	3,4639	2,539	3,460	2,537
25,5	3,463	2,537	3,462	2,538	3,461	2,538	3,461	2,537	3,4616	2,536	3,461	2,538
27	3,461	2,535	3,458	2,536	3,462	2,538	3,465	2,539	3,463	2,538	3,460	2,537
28,5	3,449	2,528	3,454	2,532	3,466	2,542	3,475	2,547	3,4697	2,543	3,456	2,534
30	3,5	3,15	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5
31,5	3,539	2,461	3,538	2,462	3,538	2,461	3,538	2,461	1,5377	2,461	3,538	2,461
33	3,539	2,462	3,538	2,462	3,538	2,461	3,538	2,460	3,5377	2,461	3,537	2,461

Произведем расчет магнитных сопротивлений по представленной формуле выше, с использованием коэффициента  $n$  представленного в таблице 1

Пример расчета значений магнитных сопротивлений для нулевого положения ротора:

$$R_{31}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{3.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.287 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{32}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.1}{2.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.202 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{33}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0,001}{3.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.287 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{34}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{2.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.202 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{35}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{3.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.287 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{36}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0,001}{2.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.202 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{37}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{3.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.287 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{38}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{2.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.202 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{39}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{3.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.287 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{310}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{2.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.202 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{311}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{3.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.287 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{312}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{2.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.202 \cdot 10^5 \text{ Ом}.$$

Значение магнитных сопротивлений для угла поворота ротора 6 градуса:

$$R_{31}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.1}{3.538 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.263 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{32}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{2.4619 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.253 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{33}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{3.5377 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.263 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{34}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{2.4622 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.251 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{35}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{3.5377 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.263 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{36}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{2.4622 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.251 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{37}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{3.538 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.263 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{38}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{2.4619 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.253 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{39}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{3.5374 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.263 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{310}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{2.4616 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.253 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{311}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{3.5377 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.263 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{312}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{2.4616 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.253 \cdot 10^5 \text{ Ом}.$$

## 2 Расчет магнитных сопротивлений ротора

Произведен расчёт магнитных сопротивлений от обмотки ротора асинхронного двигателя. Магнитное сопротивление ярма ротора и зубцовой зоны ротора для соответствующих катушек останутся прежними. Также останутся без изменения и магнитные сопротивления ярма статора и зубцовой зоны статора для соответствующих катушек.

При повороте ротора изменится величина магнитного сопротивления воздушного зазора по следующей зависимости:

$$R_{3i}^{(k)} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\delta}{n b_{3c} l_m}$$

где  $R_{zi}^{(k)}$  – общее магнитное сопротивление воздушного зазора  $i$ -ой катушки при  $(k)$ -ом угле сдвига оси поля ротора относительно оси поля статора;  $n$  – коэффициент для каждого сопротивления.

В рассматриваемом типе двигателя обмотка ротора выполнена по типу беличьей клетки. Токи в данной типе обмотки распределяются по полюсам

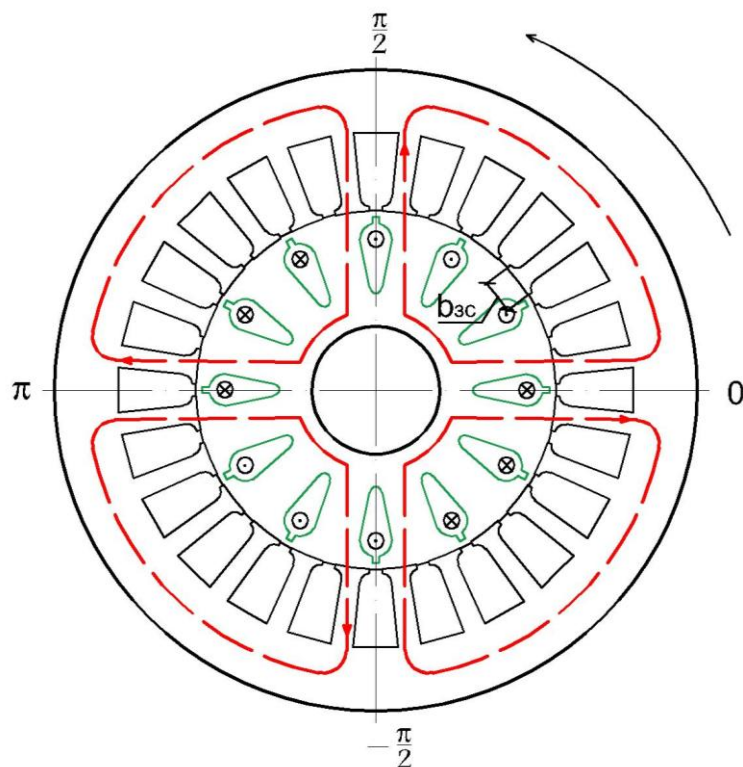


Рис.4. Распределение токов в обмотке ротора

Так как в рассматриваемом электрическом двигателе используется симметричная обмотка статора, а обмотка ротора выполнена по типу беличьей клетки, это предполагает, что количество катушек обмотки ротора будет равно количеству полюсов сформированных обмоткой статора. Поэтому в данном электрическом двигателе коэффициент  $n$  будет постоянным и равен 6.

Произведем расчет для данного значения:

$$R_{z1}^{(28.5)} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{6 \cdot 0.01468 \cdot 0.055} = 16.435 \cdot 10^4 \text{ Ом.}$$

Предложенный подход к определению магнитных параметров позволит правильно производить оптимизационные задачи [9] при создании специальных типов электрических приводов и реализовывать предложенные алгоритмы в общепромышленных устройствах управления технологическими процессами [10].

**Список литературы:**

1. Карандей В.Ю. Управляемый каскадный электрический привод с жидкостным токобменом / В.Ю. Карандей, Б.К. Попов // Патент на изобретение № 2461947 зарегистрировано 20.09.2012 г.
2. Попов Б.К. Управляемый каскадный асинхронный электропривод с общим ротором/ Попов Б.К., Попова О.Б. // Патент на изобретение № 2556862 зарегистрировано 21.07.2014 г.
3. Шмитц Н. Введение в электромеханику [Текст] /Н. Шмитц, Д. Новотный// – Пер. с англ. – М.: Энергия, 1969. – 336 с.
4. Вольдек А.И. Электрические машины [Текст] /А.И. Вольдек// – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
5. Киреев В.И. Численные методы в примерах и задачах [Текст] / В.И. Киреев, А.В. Пантелеев. – М.: Высш. шк., 2004. – 480 с.
6. Даффин Р. Геометрическое программирование [Текст] /Р. Даффин, Э. Питерсон, К. Зенер// – Пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – 311 с.
7. Попова О.Б. Математическое моделирование и оптимизация специальных электромеханических систем :Дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 [Текст] /О.Б. Попова// – Краснодар, 2002. – 214 с.
8. Карандей В.Ю. Математическое моделирование специальных электрических приводов для оборудования нефтегазовой отрасли / В.Ю. Карандей, В.Л. Афанасьев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2017. – №08(132). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2017/08/pdf/72.pdf> , 0,978 у.п.л. – IDA [article ID]: 1321708072. <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-132-072>
9. Popova O. Optimetl: software for selecting the optimal method Popova O., Popov B., Romanov D., Evseeva M. SoftwareX. 2017. T. 6. C. 231-236.
10. Попов Б.К. Интеллектуальное микропроцессорное устройство автоматического управления приборами/ Попов Б.К., Попова О.Б., Ключко В.И.// Патент на изобретение № 2542881 зарегистрировано 30.10.2012г.

**СРЕДСТВА И УСТРОЙСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ.  
МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УСТРОЙСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ**

*Ткачев А.К., Майков Р.А.*

*Научный руководитель: Кладиев С.Н., к.т.н., доцент каф. ЭПЭО ЭНИИ*

***Общие понятия о релейной защите. Назначение устройств РЗА.***

Релейная защита является основным видом электрической автоматики, без которой невозможна нормальная и надежная работа современных энергетических систем. Она осуществляет непрерывный контроль за состоянием и режимом работы всех элементов энергосистемы и реагирует на возникновение повреждений и ненормальных режимов. (Ненормальные режимы: Перегрузка оборудования, вызванная сверхтоком, т. е. увеличением тока сверх номинального значения). При возникновении ненормальных режимов защита выявляет их и в зависимости от